



环境科学

Environmental Science

ISSN 0250-3301, CN 11-1895/X

《环境科学》网络首发论文

题目：九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应
作者：黄亚玲，唐莉，黄金良，肖才荣
DOI：10.13227/j.hjlx.201905234
收稿日期：2019-05-30
网络首发日期：2019-08-27
引用格式：黄亚玲，唐莉，黄金良，肖才荣．九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应．环境科学. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.201905234>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应

黄亚玲^{1,2}, 唐莉¹, 黄金良^{1*}, 肖才荣¹

(1. 厦门大学环境与生态学院, 厦门 361102; 2. 闽江学院海洋研究院, 福州 350108)

摘要: 本研究应用现场监测、地理信息技术(GIS)、模型模拟和数理统计等方法, 基于2015年3月至2017年2月九龙江流域不同主导土地利用类型源头小流域和两条干流河流表层水总磷(TP)、总溶解态磷(TDP)和颗粒态磷(PP)的浓度监测, 探究河流磷浓度与输出负荷的时空变化特征, 揭示九龙江流域磷输出对土地利用模式及水文状况的响应。结果发现, 九龙江流域河流磷浓度和磷输出负荷具有明显的时空变异性。在空间上, 农业流域>城市流域>自然流域, 西溪>北溪。在季节上, 不同类型流域不同形态磷浓度总体表现为春、冬季节较高, 而夏、秋季节较低。TP、TDP、和PP输出负荷表现为春、夏季高于秋、冬季, 与径流深度的变化趋势基本一致。磷浓度、输出负荷与林地和裸地面积百分比呈负相关关系, 与耕地、果园面积百分比呈正相关关系。但不同季节, 磷浓度和输出负荷对土地利用和水文状况的响应存在差异, 在夏季的相关性最强。结果表明农业非点源污染是九龙江流域河流磷的关键源, 提升林地比例有助于保持水土, 改善河流水质, 尤其在雨季。

关键词: 近海流域; 磷输出; 土地利用模式; 水文状况; 时空变异性

中图分类号: X52 **文献标识码:** A

DOI: 10.13227/j.hjlx.201905234

Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed

HUANG Ya-ling^{1,2}, TANG Li¹, HUANG Jin-liang^{1*}, XIAO Cai-rong¹

(1. College of the Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. Institute of Oceanography, Minjiang University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In-situ monitoring, geographic information technology (GIS), watershed model, and statistical techniques

收稿日期: 2019-05-30; 修订日期: 2019-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471154); 厦门大学校长基金项目(20720150129)

作者简介: 黄亚玲(1988~), 女, 博士, 主要研究方向为流域水环境, E-mail: huangyaling0602@163.com

*通信作者, E-mail: jlhuang@xmu.edu.cn

were coupled in this study to explore the responses of riverine phosphorus exports to land use pattern and hydrological regime in the Jiulong River Watershed (JRW). We analyzed the riverine phosphorus concentrations and exports during Mar. 2015 to Feb. 2017 across a land use gradient spanning 14 monitored sampling sites. Results showed that significantly spatial and seasonal variations of phosphorus concentrations and exports were observed in JRW. Mean phosphorus concentrations and exports were the highest in agricultural watershed, followed by urban watershed, whereas West River reach had higher mean phosphorus concentration and export than North River reach. Mean concentrations of phosphorus were higher in spring and winter, whereas lower concentrations were observed in autumn and summer. Phosphorus exports were higher in spring and summer, consistent with the seasonal trend of runoff. Phosphorus concentrations and exports had negative correlations with percentages of forest and bareland, and were positively correlated with cropland and orchard. The responses of riverine phosphorus to land use types and hydrological regime varied across seasons, whereas the relationships between phosphorus concentrations/exports and land use & runoff were the strongest in summer, suggesting that non-point source pollution associated with agricultural activities would be the critical source of riverine phosphorus and increment of forest percentage could be useful for improving water quality. Overall, the spatiotemporal pattern of phosphorus exports were affected by land use pattern, as well as the characteristics of hydrological regime.

Key words: coastal watershed; phosphorus exports; spatiotemporal variation; land use pattern; hydrological regime

磷作为限制性营养盐^[1], 过量输入会造成水体富营养化和其他生态损害, 威胁我们所依赖的生态系统服务与功能^[2, 3]。研究表明, 河流磷营养盐状况是植被、土壤、地形、气候和土地利用状况等自然和人为因素综合作用的结果^[4], 而这些影响因素受到人类活动和气候变化的共同作用^[5, 6]。在流域范围内, 土地利用主要通过影响污染源类型、污染物产生量以及传输过程, 从而决定河流磷空间分布格局^[7, 8]。受气候变异性或气候变化影响的水文过程和生物地球化学过程是驱动磷输出季节变化的重要因素^[9-11]。因此, 在流域尺度上, 从土地利用模式和水文变异性等视角, 综合分析磷输出的时空分布特征及其驱动因素, 对流域综合管理, 促进水资源可持续利用具有重要的参考价值。

从人类活动、气候变异性或水文变异性等角度研究河流磷输出驱动机制是近年来的热点^[1, 12-15]。目前普遍认为跟人类活动相关的水污染是导致地表水磷浓度和输出负荷增加的直接原因^[9, 16, 17], 受气候因子影响的流域水文状况, 主要通过稀释、浓缩和非直接的物质运移过程影响河流磷。由于污染源、生物地球化学过程、气候因素等的差异, 不同类型流域或区域不同形态磷输出的时空变化模式存在明显的区域性。九龙江流域作为福建省第二大河流, 是漳州、龙岩和厦门三地市超过 1000 万人口的工农业和饮用水水源地, 生态意义重大。现

有研究表明，磷是影响九龙江流域水体富营化的重要因素，如：河流呈现季节性的磷限制^[18]。^[19] 因此，本文选取深受自然和人类双重扰动的亚热带中尺度近海流域——九龙江流域为研究对象，基于不同形态磷浓度监测与分析，探究土地利用模式和水文状况对九龙江流域河流磷输出的影响，有助于九龙江流域河流磷控制和水资源的可持续利用。

1 材料与方法

1.1 研究区域

九龙江地处福建省东南沿海地区（116°46'55"~118°02'17"E，24°23'53"~25°53'38"N），流经农业集约化程度高的漳州平原，是福建省第二大河流，主要由北溪、西溪两大干流构成，在漳州龙海市福河口汇合，由厦门港入海（图 1）。流域总面积 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，其中北溪和西溪流域的面积分别为 9560 km^2 和 3772 km^2 。北溪发源于龙岩梅花山一带，2010~2017 年日平均流量 $300.0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，年平均流量 $9.47 \times 10^9 \text{ m}^3$ ；西溪源于南靖、平和以及西部的板寮岭，2010~2017 年日平均流量 $135.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，年平均流量 $4.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。北溪流经龙岩市区、漳平市、漳州华安和长泰县，主要污染源为生活污水和畜禽养殖。相比北溪流域，西溪流域海拔较低，农业活动强度大（主要种植蜜柚、龙眼、花卉和蔬菜）、人口密度高等特点。

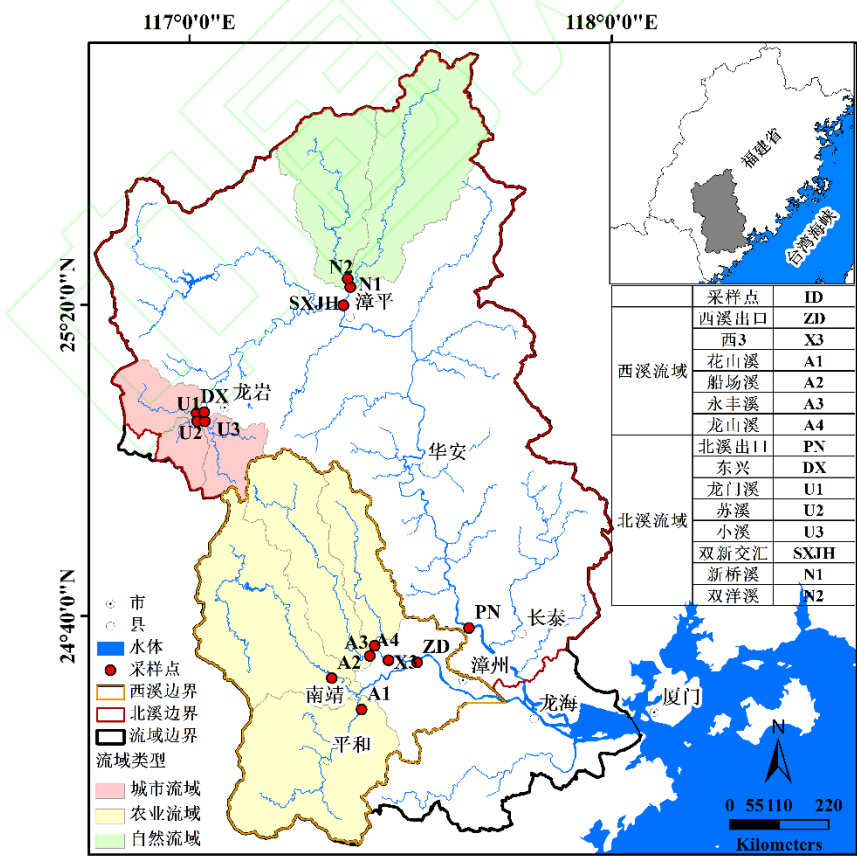


图 1 采样点位分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites

1.2 水质监测与分析

本研究遴选九龙江流域不同主导土地利用类型源头小流域（农业、城市和自然流域）及两条干流出口开展河流表层水磷营养盐监测，共设置 14 个点位。不同主导土地利用类型小流域流域划分原则为：建设用地比例高于 8% 的流域为城市流域，农业用地比例高于 10% 的流域为农业流域，林地比例高于 80% 的为自然流域^[20]。划分依据主要参考 LAWA（2003），冯媛（2012）等研究并综合考虑流域地理位置等因素设计^[21, 22]。北溪和西溪流域出口设置主要考虑到流量获取及水文模型验证的需求，因此，以省控断面为流域出口^[23]，分别在 PN 和 ZD 采样点开展水质监测。

总磷的监测时间为 2015 年 3 月至 2017 年 2 月，溶解态总磷和颗粒态总磷的监测时间为 2015 年 7 月至 2017 年 2 月。2015 年 3 月至 2016 年 3 月的采样频率为每月 2 次，2016 年 4 月至 2017 年 2 月为每月 1 次。本研究使用有机玻璃采水器（型号为 WB-PM）采集九龙江流域各站点表层水（距水面 0.5 m），一般在桥中央采集，样品采集完后立即放入 4 °C 的采样箱保存，带回实验室测定。采用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法测定表层水的总磷（TP）和溶解态总磷（TDP），颗粒态磷（PP）=TP-TDP^[24]。

1.3 研究方法

1.3.1 流量模拟

本研究应用九龙江流域已构建的 HSPF 模型^[25]模拟未设置水文监测站点的 12 个小流域采样点的流量。利用 Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (E_{ns}) 和决定系数 (R^2) 来评估 HSPF 模型在流量校准和验证过程的效果。结果表明 HSPF 模型对九龙江流域日径流量的模拟效果较好（表 1）。

表 1 HSPF 径流量模拟表现

Table 1 Performance of HSPF in simulating runoff

位置	日径流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$			
	E_{ns}		R^2	
	校准期	验证期	校准期	验证期
北溪	0.60	0.67	0.61	0.67
西溪	0.67	0.79	0.70	0.80

1.3.2 通量的计算

采用两种较为常用的方法来计算磷的通量：全局平均法（global mean method）、流量权重法（flow weighted method），并用这两种方法的均值进行进一步的产出计算^[26]。

(1) 全局平均法

全局平均法是用所有样品浓度的均值与研究期流量的总值相乘，其表达式见公式（1），该方法并未考虑水文响应。

$$\text{Flux} = m \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{n} \times Q_t \quad (1)$$

式中， c_i 是水样浓度（ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ）； Q_t 是年径流量（ $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ）； n 是月采样次数； m 是单位转换因子。

(2) 流量权重法

流量权重法是利用流量对浓度进行加权，即通量由年流量与加权浓度相乘得到，其表达式见公式（2），该方法考虑到了水文响应，应用较为广泛。

$$\text{Flux} = m \frac{\sum_{i=1}^n c_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \times Q_t \quad (2)$$

式中， Q_i 是采样当天的流量（ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ），其他参数含义同上。

1.3.3 统计分析

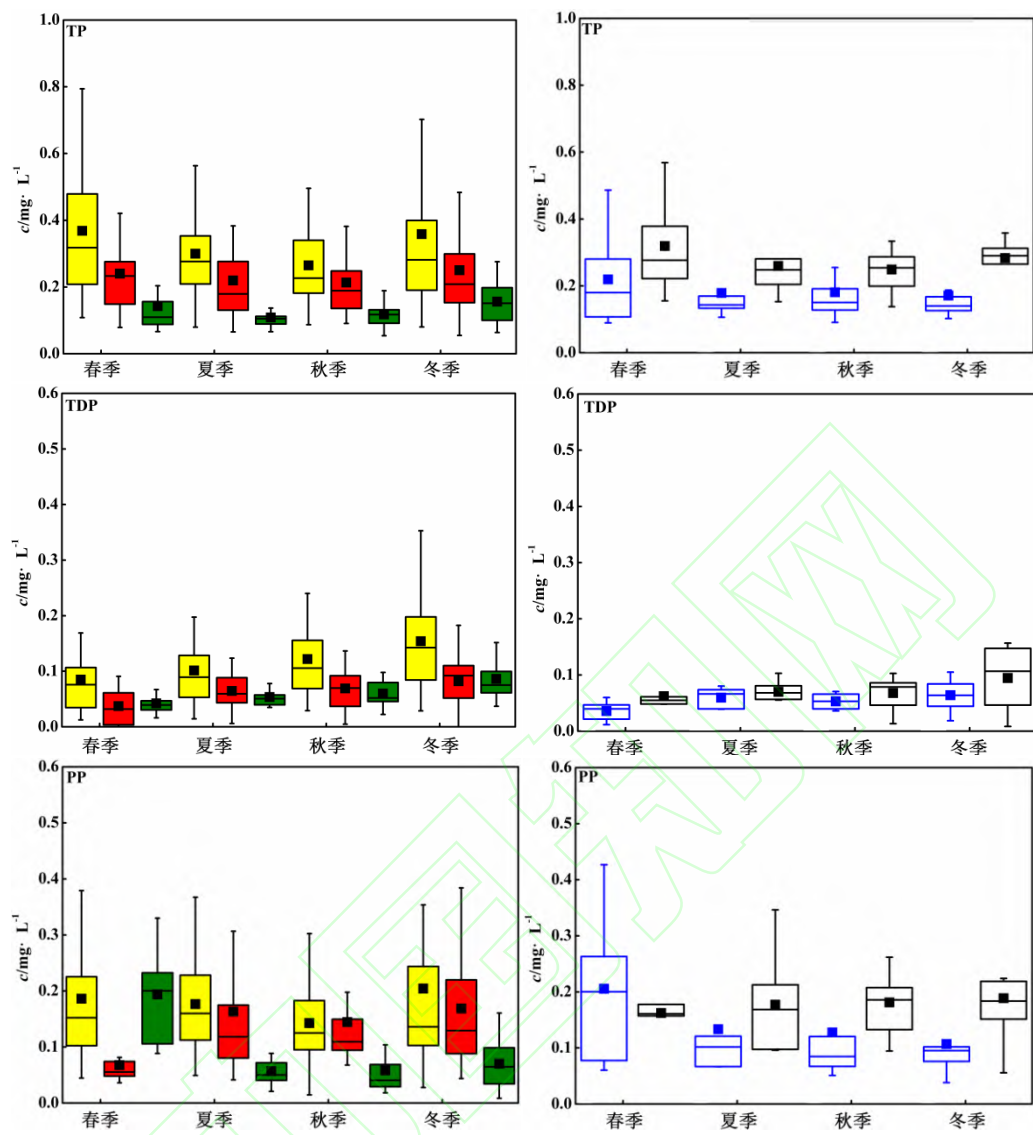
Pearson 相关分析是研究变量之间关系紧密程度的一种统计方法，主要用于描述变量之间的相关关系。运用 Pearson 相关分析方法，探究土地利用、水文状况与磷浓度和输出负荷的关系。本研究中主要利用的数据分析软件为 ArcGIS 10.7、SPSS 17.0 和 OriginPro 8.0。

2 结果与分析

2.1 河流磷浓度的时空分布特征

九龙江流域河流表层水磷浓度存在明显的时空差异（图 2）。在空间尺度上，大部分形态磷的平均浓度变化趋势为：农业流域>城市流域>自然流域，西溪>北溪。在时间尺度上，农业流域的颗粒态总磷（PP）平均浓度值在冬、春季高，夏、秋季低；在城市流域，PP 平均浓度则在夏、冬季高，春、秋季低；在自然流域，PP 平均浓度的最高值均出现在春季，最低值出现在夏季。所有类型小流域中，总磷（TP）平均浓度表现为春、冬季高，夏、秋季节低，溶解态总磷（TDP）均表现为春-夏-秋-冬季逐渐递增趋势。对于北溪和西溪流域出口而言，TP 平均浓度最高值也出现在春季，分别为（ 0.22 ± 0.12 ） $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和（ 0.32 ± 0.12 ） $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，浓度最低值则分别出现在冬季[（ 0.17 ± 0.09 ） $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$]和秋季[（ 0.25 ± 0.12 ） $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$]；TDP 的季节变化趋势均为冬季>夏季>秋季>春季；北溪流域出口的 PP 平均浓度在春季最高[（ 0.21 ± 0.15 ） $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$]，在冬季最低[（ 0.11 ± 0.09 ） $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$]，西溪流域 PP 平均浓度的变化趋势则反之。不同形态磷的组成而言，九龙江流域的颗粒态磷的平均浓度高于溶解态磷，说

明九龙江流域表层水磷的主要赋存形态为颗粒态磷（图 2）。



黄色、红色、绿色分别代表农业、城市、绿色小流域；蓝色和黑色分别代表北溪和西溪流域

图 2 不同形态磷浓度时空变化模式

Fig. 2 Spatiotemporal variations of phosphorus concentrations

2.2 河流磷输出负荷时空分布特征

农业流域和西溪流域的径流深度 (runoff) 变化模式为夏季>春季>秋季>冬季，而城市流域、自然流域以及北溪流域的径流深度由春季到冬季逐季节递减。在春季，城市流域和自然流域的径流深度高于农业流域，而在其余季节，则反之（图 3）。

不同尺度、不同类型流域的不同形态磷输出负荷存在明显的季节变异性（图 3）。对于农业流域而言，TP 输出负荷的最高值出现在夏季，春季次之，而秋、冬季无明显差异；对于城市流域而言，TP 输出负荷的变化模式为春季>夏季>冬季>秋季。自然流域的 TP 输出负荷的季节变化模式与城市流域一致。对于两条干流而言，西溪的 TP 输出负荷最高值也出现

在夏季，即径流高的季节；北溪的 TP 输出负荷在春季最高，夏季次之，输出负荷的最低值出现在冬季。3 种典型小流域以及两条干流的 TDP 和 PP 输出负荷均表现为春、夏高，秋冬低的变化趋势。总体而言，农业流域的磷输出负荷最高，城市流域次之，西溪高于北溪。

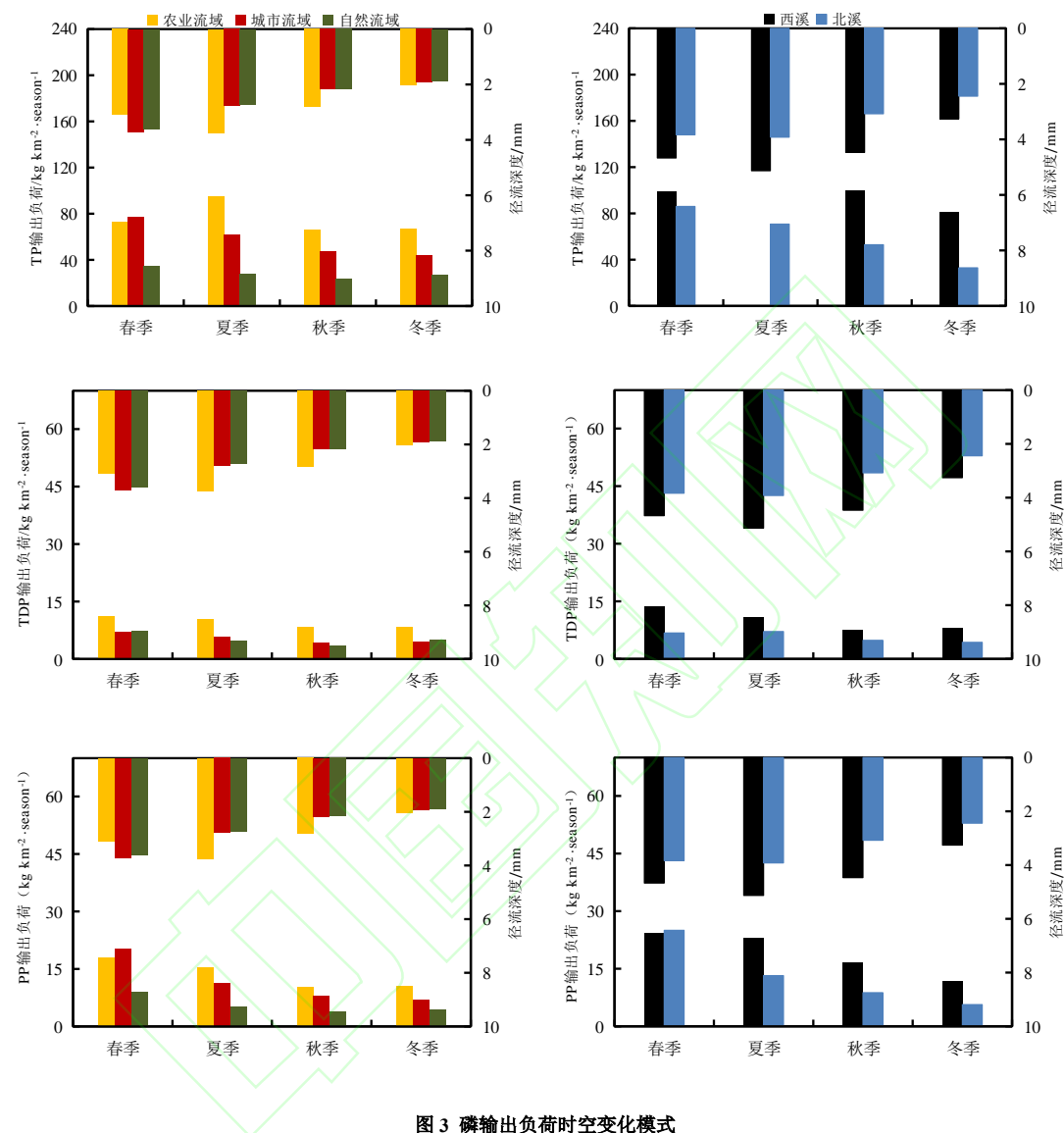


图 3 磷输出负荷时空变化模式

Fig. 3 Spatiotemporal variations of phosphorus exports

2.3 河流磷输出与土地利用和水文状况的关系

不同季节磷浓度和输出负荷与土地利用面积百分比和径流深度的关系呈非稳定模式。总体而言，磷浓度和输出负荷与林地、裸地面积百分比呈负相关关系，与农业用地和果园面积百分比呈正相关，而不同形态磷浓度和负荷与建设用地的关系不一致（表 2）。相比建设用地，农业用地与磷输出的关系更密切，意味农业活动的空间差异是导致九龙江流域不同主导土地利用类型流域河流磷输出差异的重要因素。对于不同季节而言，林地面积百分比与所有形态磷的浓度和输出负荷的负相关性最强，尤其是与 PP 的浓度呈显著负相关性，说明在

丰水季节林地可以有效保持水土，减少河流中 PP 的输入。与其他季节相比，TP、TDP 和 PP 浓度及输出负荷在夏季与耕地、果园和径流深度的正相关性也是较强的，表明在夏季农业非点源污染源是河流磷的重要来源。

表 2 磷浓度及输出负荷与环境因子的 Pearson 相关关系¹⁾

Table 2 Pearson correlations between phosphorus concentrations & exports and environmental factors

水质指标	季节	林地	耕地	建设用地	果园	裸地	径流深度	样本数
TP 浓度	春	-0.18	0.24	-0.01	0.17	-0.35	0.17	14
	夏	-0.43	0.43	0.19	0.27	-0.34	0.25	14
	秋	-0.38	0.38	0.19	0.22	-0.29	0.19	14
	冬	-0.34	0.39	0.07	0.28	-0.34	0.09	14
TDP 浓度	春	-0.24	0.45	-0.21	0.34	-0.53	0.05	14
	夏	-0.27	0.38	-0.01	0.23	-0.56*	0.29	14
	秋	-0.23	0.35	-0.04	0.22	-0.49	0.14	14
	冬	-0.24	0.37	-0.11	0.28	-0.45	0.06	14
PP 浓度	春	-0.43	0.23	0.51	0.08	-0.10	-0.26	14
	夏	-0.58*	0.40	0.47	0.27	-0.20	0.14	14
	秋	-0.43	0.31	0.37	0.16	-0.01	0.18	14
	冬	-0.39	0.36	0.19	0.25	-0.22	0.10	14
TP 输出负荷	春	-0.41	0.27	0.41	0.11	-0.04	-0.12	14
	夏	-0.48	0.60*	0.02	0.41	-0.15	0.46	14
	秋	-0.40	0.52	0.01	0.32	-0.05	0.40	14
	冬	-0.43	0.52	0.02	0.37	-0.19	0.18	14
TDP 输出负荷	春	-0.34	0.54*	-0.16	0.40	-0.61*	0.18	14
	夏	-0.43	0.70**	-0.21	0.49	-0.49	0.56*	14
	秋	-0.41	0.65*	-0.14	0.43	-0.44	0.37	14
	冬	-0.39	0.63*	-0.22	0.49	-0.43	0.18	14
PP 输出负荷	春	-0.42	0.30	0.38	0.13	-0.06	0.01	14
	夏	-0.58*	0.64*	0.11	0.45	-0.18	0.43	14
	秋	-0.47	0.55*	0.08	0.35	-0.06	0.36	14
	冬	-0.50	0.64*	-0.04	0.49	-0.24	0.21	14

1) *代表显著性水平为<0.05; **代表显著性水平为<0.01

3 讨论

3.1 河流磷输出的空间变异性

九龙江流域河流磷浓度和磷输出存在明显的空间差异。农业流域磷浓度和输出负荷高于其他两种类型流域，其中农业流域的总磷输出高于城市流域和自然流域 5~16 倍，西溪高于北溪。总体上农业活动强度越大的流域，磷浓度和输出负荷越高，说明农业面源污染是导致九龙江流域水体中磷输出空间变化的重要因素。磷是流域水体的重要组成部分，也是农业

生产不可或缺的营养元素。因此，在农业生产较发达的地区其河流水体中的磷通常能反映农业生产活动的情况^[27]。

在流域范围内，土地利用主要通过影响污染源类型、污染物产生量以及传输过程^[28]，从而决定河流污染物空间分布格局。农业小流域位于平和、南靖农业发展集约化区域，该区域果园和耕地占地面积大，化肥施用量高，表明农业面源污染会造成水体中磷污染^[1, 29]。城市小流域位于龙岩市区，社会经济相对发达，生活污水排河以及未处理的生活垃圾渗透等因素使得河流水质相对较差，加之城市流域的上游仍然存在一些畜禽养殖，其 TP 浓度和输出复合仅次于农业流域。其他研究也表明，生活污水和工业废水是河流磷的重要来源^[9, 16]。自然流域林地所占比重大，植被覆盖是防护水土流失的天然屏障，而且人类活动强度较低，污染源较少，TP 浓度总体较低，与其他研究结果一致^[30]。西溪流域的农业活动强度和人口密度均比北溪流域大，其总磷、活性磷酸盐和颗粒态磷的浓度总体上高于北溪，进一步说明了人类活动导致的污染源差异是河流磷输出空间差异的重要驱动因素^[12, 31]。此外，农业流域和西溪流域的 PP 浓度和输出负荷远远高于其他类型小流域和北溪，说明农业活动，尤其是坡地果园开发导致的水土流失也是影响九龙江流域河流磷输出的重要因素^[29]。总体上，各季节农业流域的磷浓度波动性高于城市和自然流域，西溪高于北溪。

3.2 河流磷输出的时间变异性

不同类型流域不同磷形态浓度总体表现为春、冬季节较高，而夏、秋季节较低。春季是九龙江流域的耕作季节，农事活动频繁，化学施用量大，加上 3~5 月的梅雨季节，容易造成磷流失，直接导致河流磷浓度增加^[13]。冬季为枯水期，降雨量少，径流小，不利于排入河道的污染物稀释^[32, 33]。夏季为丰水期，随着径流导致河流量增大，面源污染物被径流冲刷入河，但是在河流中的磷滞留时间短，且流量对磷浓度的稀释作用大于冲刷作用，河流的自净能力大，导致 P 平均浓度降低^[34]。相比春、夏季节，秋季为收获阶段，化肥施肥量、降雨量和径流量减少，总体入河的污染物总量有所削减，河流水质状况较好。但对于输出负荷而言，TP、TDP 和 PP 输出负荷表现为春、夏季高于秋、冬季，与径流深度的变化趋势一致。径流深度大的季节，磷输出负荷高，说明水文状况是控制磷输出负荷的重要因子^[35, 36]。

温度的季节变化导致的微生物的转化过程存在差异，也是影响河流水质季节变化的重要因素^[37]。冬、春季，温度较低，不利于沉水植物及浮游植物活动，其在此阶段处于休眠状态，对流域中的磷利用率低。另外，上层水中藻类下沉到沉积物中，沉积物中藻类丰富，导致颗粒态总磷浓度偏高。夏秋季，温度较高，流域浮水及沉水植物处于活跃状态，藻类在上层水中较丰富，所以对磷的利用率高^[32, 38]。此外，在春、夏季节，降雨较为丰富，PP 占 TP 的比

重高于秋、冬季,说明在雨季水土流失对河流磷的贡献不可忽视.九龙江流域土壤表层土壤的全磷含量为 $0.28\sim 2.46\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,降雨主要集中在春、夏季节,造成土壤侵蚀,水土流失,加剧水质恶化,因此,在春、夏季节特别要重视水土流失带来的水环境问题.

3.3 河流磷输出对土地利用和水文状况的响应

河流水质受到自然和人为因素的综合作用^[37, 39],本研究发现土地利用类型和水文状况与河流磷浓度及输出负荷关系密切.总体而言,磷浓度、输出负荷与林地和裸地面积百分比呈负相关关系,与耕地、果园面积百分比呈正相关关系,而不同形态磷的浓度与输出负荷与建设用地和径流深度的关系不一致.研究结果进一步表明,农业活动(如化肥施用)是九龙江流域河流磷的重要来源,而林地比例增加有助改善河流水质^[11, 49],这与其他研究结论一致^[8, 41].

由于流域特征、污染源类型、污染物排放量以及迁移转化过程的时空差异^[42],土地利用和水文状况与磷浓度和输出负荷的关系存在不稳定性.总体而言,耕地和径流深度与磷浓度和输出负荷在夏季的关系最密切,说明农业非点源污染是河流磷的关键源.此外,耕地和径流深度与磷输出负荷的相关系数高于磷浓度,而磷浓度或输出负荷与土地利用与的相关系数高于径流深度,说明河流磷输出负荷受到人类活动和水文状况的综合作用,农业活动是影响河流磷输出的主要因素,河流径流增加对磷输出负荷具有一定的增益效应^[43].林地与大部分磷浓度和输出负荷的负相关系数也是在夏季最高,尤其是与颗粒态磷(PP)呈显著负相关性,进一步验证林地的比例增加有助于保持水土,改善河流水质.建设用地对不同指标的影响不同,与PP的关系最密切,尤其在春、夏季节,说明在雨季城市径流也是河流PP的一个重要来源^[44].

4 结论

(1) 磷浓度和输出负荷存在明显的空间差异.总体表现为农业流域>城市流域>自然流域,西溪>北溪,说明农业面源污染的空间差异是决定九龙江流域水体中磷输出空间变化的决定性因素.

(2) 不同类型流域不同磷形态浓度总体表现为春、冬季节较高,而夏、秋季节较低.磷输出负荷表现为春、夏季高于秋、冬季,与径流深度的变化基本趋势一致,说明水文状况是控制磷输出负荷季节变化的重要因子.

(3) 磷浓度、输出负荷与林地和裸地与呈负相关关系,与耕地、果园面积百分比和径流深度呈正相关关系,而不同形态磷浓度和输出负荷与建设用地的关系不一致,表明河流磷输出时空变化特征受土地利用模式和水文状况的共同作用.但不同季节,磷浓度和输出负荷对土地利用模式和水文状况的响应存在差异,总体上在夏季的相关性最强,说明在夏季农业非点源污染源是河流磷的重要来源.

参考文献:

- [1] 李莹杰, 王丽娟, 李虹, 等. 不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素 [J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2170-2177.
- Li Y J, Wang L J, Li H, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of phosphorus in the Dongting Lake at different water periods [J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2170-2177.
- [2] Paerl H W. Assessing and managing nutrient-enhanced eutrophication in estuarine and coastal waters: Interactive effects of human and climatic perturbations [J]. Ecological Engineering, 2006, **26**(1): 40-54.
- [3] Whitehead P G, Grossman J. Macronutrient cycles and climate change: Key science areas and an international perspective [J]. Science of the Total Environment, 2012, **434**: 13-17.
- [4] Canter L W. River water quality monitoring [M]. Boca Raton: Chemical Rubber Company Press, 2017.
- [5] Vorosmarty C J, McIntyre P B, Gessner M O, *et al.* Global threats to human water security and river biodiversity [J]. Nature, 2010, **467**(7315): 555-561.
- [6] Kundzewicz Z W, Krysanova V. Climate change and stream water quality in the multi-factor context [J]. Climate change, 2010, **103**(3-4): 353-362.
- [7] Hale R L, Grimm N B, Vorosmarty C J, *et al.* Nitrogen and phosphorus fluxes from watersheds of the northeast US from 1930 to 2000: Role of anthropogenic nutrient inputs, infrastructure, and runoff. Global Biogeochemical Cycles, 2015, **29**: 341-356.
- [8] 王琼, 卢聪, 范志平, 等. 辽河流域太子河流域N、P和叶绿素a浓度空间分布及富营养化 [J]. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 297-307.
- Wang Q, Lu C, Fan Z P, *et al.* Eutrophication and spatial distribution of N, P and chlorophyll-a in the Taizihe River Basin, Liaoh River Catchment [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(2): 297-307.
- [9] Duan S, Kaushal S S, Groffman P M, *et al.* Phosphorus export across an urban to rural gradient in the Chesapeake Bay watershed [J]. Journal of Geophysical Research, 2012, **117** (G1): 105-115.
- [10] Ouyang Y, Nkedi-Kizza P, Wu Q T, *et al.* Assessment of seasonal variations in surface water quality [J]. Water Research, 2006, **40**(20): 3800-3810.
- [11] 卓泉龙, 林罗敏, 王进, 等. 广州流溪河氮磷浓度的季节变化和空间分布特征 [J]. 生态学杂志, 2018, **37**(10): 3100-3109.
- Zhuo Q L, Lin L M, Wang J, *et al.* Seasonal and spatial variation of nitrogen and phosphorus concentrations in Liuxi River in Guangzhou [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(10): 3100-3109.
- [12] Kaushal S S, Pace M L, Groffman P M, *et al.* Land use and climate variability amplify contaminant pulses [J]. Eco, Transactions American Geophysical Union, 2010, **91**(25): 221-222.
- [13] Morse N B, Wollheim W M. Climate variability masks the impacts of land use change on nutrient export in a suburbanizing watershed [J]. Biogeochemistry, 2014, **121**(1): 45-59.

- [14] 华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 等. 三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征 [J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 138-146.
- Hua L L, Li W C, Zhai L M, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area [J]. Environmental Science, 2017, **38**(1): 138-146.
- [15] 秦延文, 韩超南, 郑丙辉, 等. 三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析 [J]. 环境科学, 2019, **40** (5): 2152-2159.
- Qin Y W, Han C N, Zheng B H, *et al.* Analysis of transport and transformation characteristics between dissolved phosphorus and particulate phosphorus in water of the Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2019, **40** (5): 2152-2159.
- [16] 张亚娟, 李崇巍, 胡蓓蓓, 等. 城镇化流域“源-汇”景观格局对河流氮磷空间分异的影响. 生态学报, 2017, **37**(7): 2437-2446.
- Zhang Y J, Li C W, Hu B B, *et al.* Impact of a “source-sink” landscape pattern in an urbanized watershed on nitrogen and phosphorus spatial variations in rivers: a case study of Yuqiao Reservoir watershed, Tianjin, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(7): 2437-2446.
- [17] 孙丽梅, 裘钱玲琳, 杨磊, 等. 长三角城郊樟溪流域水体氮磷分布特征及其影响因素[J]. 生态毒理学报, 2018, **13**(4): 30-37.
- Sun L M, Qiuqian L L, Yang L, *et al.* Distribution of nitrogen and phosphorus and its influencing factors in Zhangxi Watershed of a Peri-urban area in the Yangtze River Delta [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, **13**(4): 30-37.
- [18] 陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 等. 东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动[J]. 环境科学, 2015, **36**(9):120-129.
- Chen C C, Rao L, Huang J L, *et al.* Seasonal variation on nutrient limitation for phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China [J]. Environmental Science, 2015, **36**(9):120-129.
- [19] Li Y, Cao W Z, Su C X, *et al.* Nutrient sources and composition of recent algal blooms and eutrophication in the northern Jiulong River, Southeast China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **63**(5-12): 249-254.
- [20] Huang Y L, Huang J L, Ayu E, *et al.* Land use and climate variability amplifies watershed nitrogen exports in coastal China [J]. Ocean & Coastal Management, 2018. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2018.02.024.
- [21] LAWA. German Guidance document for the implementation of the EC Water Framework Directive [OL]. 2003, <http://www.lawa.de/Publikationen.html>.
- [22] 冯媛. 九龙江流域不透水地表提取及其与水质关联分析 [D]. 厦门: 厦门大学, 2012.
- Feng Y. Estimating impervious surface areas (ISA) and linking ISA with stream water quality in the Jiulong River Basin [D]. Xiamen: Xiamen University, 2012.
- [23] 黄金良, 洪华生, 杜鹏飞, 等. 基于 GIS 和 DEM 的九龙江流域地表水文模拟 [J]. 中国农村水利水电, 2005, **2**: 44-46, 50.
- Huang J L, Hong H S, Du P F, *et al.* Surface water hydrology simulation of Jiulong River Basin based on GIS and DEM [J]. China Rural Water and Hydropower, 2005, **2**: 44-46, 50.
- [24] 李乐, 王圣瑞, 王海芳, 等. 滇池入湖河流磷负荷时空变化及其形态组成贡献 [J]. 湖泊科学, 2016, **28**(5): 951-960.
- Li L, Wang S R, Wang H F, *et al.* Temporal and spatial variations of phosphorus loading and the forms, compositions and contribution

- in inlet river of Lake Dianchi [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(5): 951-960.
- [25] 周培. 流域尺度土地利用与水质关联研究的理论分析与实践 [D]. 厦门: 厦门大学, 2016.
- Zhou P. The linkage between land use and water quality at the watershed scale: theory and practice [D]. Xiamen: Xiamen University, 2016.
- [26] Huang J C, Lee T Y, Kao S J, *et al.* Land use effect and hydrological control on nitrate yield in subtropical mountainous watersheds [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, **16**(3): 699-714.
- [27] 田宇鹏. 九龙江河水营养元素的地理化学特征 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2018.
- Tian Y P. The Geochemical characteristics of nutrient elements in river water in Jiulongjiang Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [28] Yu S, Xu Z, Wu W, *et al.* Effect of land use types on stream water quality under seasonal variations and topographic characteristics in the Wei River basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2016, **60**: 202-212.
- [29] 黄金良, 洪华生, 张珞平, 等. 基于 GIS 的九龙江流域农业非点源氮磷负荷估算研究 [J]. *农村环境科学学报*, 2004, **23**(5): 866-871.
- Huang J L, Hong H S, Zhang L P, *et al.* Nitrogen and phosphorus loading of agricultural non-point sources in Jiulong River Watershed based on GIS [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, **23**(5): 866-871.
- [30] Tu J. Spatially varying relationships between land use and water quality across an urbanization gradient explored by geographically weighted regression [J]. *Applied Geography*, 2011, **31**(1): 376-392.
- [31] Hunter H M, Walton R S. Land-use effects on fluxes of suspended sediment, nitrogen and phosphorus from a river catchment of the Great Barrier Reef, Australia [J]. *Journal of hydrology*, 2008, **336**(1-2): 131-146.
- [32] 金鑫, 单保庆, 李思敏, 等. 北方典型干旱缺水型河流氮磷时空分布特征与富营养化评价 [J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(7): 3538-3544.
- Jin X, Shan B Q, Li S, *et al.* Temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment in typical arid river northern China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(7): 3538-3544.
- [33] 赵光影, 刘景双, 王洋, 等. 三江平原主要河流氮、磷营养元素时空变化规律研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2009, **23**(2): 144-149.
- Zhao G Y, Liu J S, Wang Y, *et al.* Study on spatial and seasonal changes of the content of carbon, nitrogen and phosphorus in Marsh Rivers [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, **23**(2): 144-149.
- [34] Smith D R, Warnemuenda E A, Haggard B E, *et al.* Changes in sediment-water column phosphorus interactions following sediment disturbance [J]. *Ecological Engineering*, 2006, **27**(1): 71-78.
- [35] 陈能汪, 吴殷琪, 张玉珍, 等. 流域氮磷输出、河流输送与库区富营养化关联分析-以福建山仔水库为例 [J]. *农业环境科学*

学报, 2013, **32**(9): 1862-1869.

Chen N W, Wu Y Q, Zhang Y Z, *et al.* Linking watershed nutrient loads and riverine export to reservoir eutrophication: The case of Shanzai Reservoir, Fujian Province [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(9): 1862-1869.

- [36] Morse N B, Wollheim W M. Climate variability masks the impacts of land use change on nutrient export in a suburbanizing watershed [J]. Biogeochemistry, 2014, **121**(1): 45-59.

- [37] Huang J L, Huang Y L, Zhang Z Y. Coupled effects of natural and anthropogenic controls on season and spatial variations of river water quality during baseflow in a coastal watershed of southeast China [J]. PLoS One, 2014, **9**(3): e91528.

- [38] 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 蠡湖水体氮、磷时空变化及差异性分析 [J]. 中国环境科学, 2014, **34**(5): 1268-1276.

Wang S H, Wang W W, Jiang X, *et al.* Spatial-temporal dynamic changes of nitrogen and phosphorus and difference analysis in water body of Lihu Lake [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(5): 1268-1276.

- [39] Xia X H, Zhang S B, Zhang L W, *et al.* The cycle of nitrogen in river systems: sources, transformation, and flux [J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2018, **20**(6): 863-891.

- [40] 王琼, 姜德娟, 于靖, 等. 小清河流域氮磷时空特征及影响因素的空间与多元统计分析 [J]. 生态与农村环境学报, 2015, **31**(2): 137-145.

Wang Q, Jiang D J, Yu J, *et al.* Spatio-Temporal distribution of nitrogen and phosphorus and spatial and multi-variable statistical analysis of its impacting factors in Xiaoqinghe Watershed [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, **31**(2): 137-145.

- [41] Xiao H G, Wei J. Relating landscape characteristics to non-point source pollution in mine waste-located watersheds using geospatial techniques [J]. Journal of Environmental Management, 2007, **82**(1): 111-119.

- [42] Gonzales-Inca C A, Kalliola R, Kirkkala T, *et al.* Multiscale landscape pattern affecting on stream water quality in agricultural watershed, SW Finland [J]. Water Resource Management, 2015, **29**(5): 1669-1682.

- [43] Xia J, Chen S, Hao X, *et al.* Potential impacts and challenges of climate change on water quality and ecosystem: case studies in representative rivers in China [J]. Journal of Resources and Ecology, 2010, **1**(1): 31-35.

- [44] Pratt B, Chang H. Effects of land cover, topography, and built structure on seasonal water quality at multiple spatial scales [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **209**: 48-58.